

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-20-0020_改1
提出年月日	2021年2月12日

VI-3-2-2 クラス1管の強度計算方法

2021年2月

東北電力株式会社

目次

1. 一般事項	1
1.1 概要	1
1.2 適用基準	1
2. クラス1管の強度計算方法	1
2.1 計算方針	1
2.2 計算方法	2
3. 計算書の構成	17
3.1 管の応力計算書	17

1. 一般事項

1.1 概要

本計算方法は、発電用原子力設備のうち、クラス 1 管の応力計算書（以下「計算書」という。）について説明するものである。

1.2 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則」という。）
- (2) 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（以下「技術基準規則解釈」という。）
- (3) 発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。）） J S M E S N C 1 - 2005/2007）（日本機械学会 2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）
- (4) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和 55 年通商産業省告示第 5 0 1 号）（以下「告示第 5 0 1 号」という。）

2. クラス 1 管の強度計算方法

2.1 計算方針

設計基準対象施設は、それぞれの施設の評価条件での設計・建設規格による評価を実施する。技術基準規則解釈において、技術基準規則第 17 条に規定の要求に適合する材料及び構造とは、設計・建設規格によることから、クラス 1 管は、設計・建設規格 PPB-3500 による評価を実施する。加えて、施設時に適用された規格が告示第 5 0 1 号の範囲については、告示第 5 0 1 号第 46 条から第 48 条までの規定に基づく評価を実施する。

2.2 計算方法

2.2.1 解析による計算

応力計算は、三次元多質点系はりモデルによる解析により実施する。配管系の動的解析手法としては、スペクトルモーダル解析法を用いる。なお、解析は解析コード「I S A P」を使用する。評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析）コードの概要」に示す。

2.2.1.1 解析モデルの作成

配管系の解析モデル作成に当たっては、以下を考慮する。

- (1) 配管系は三次元多質点系はりモデルとし、曲げ、せん断、ねじり及び軸力に対する剛性を考慮する。
- (2) 弁等の偏心質量がある場合には、その影響を評価できるモデル化を行う。また、弁の剛性を考慮したモデル化を行う。
- (3) 同一モデルに含める範囲は、原則としてアンカ点からアンカ点までとする。
- (4) 分岐管がある場合には、その影響を考慮できるモデル化を行う。ただし、母管に対して分岐管の径が十分に小さく、分岐管の振動が母管に与える影響が小さい場合にはこの限りではない。
- (5) 質点は応力が高くなると考えられる点に設定するとともに、代表的な振動モードを十分に表現できるように、適切な間隔で設ける。
- (6) 配管の支持構造物は、以下の境界条件として扱うことを基本とする。
 - a. レストレイント：拘束方向の剛性を考慮する。
 - b. スナッパ：拘束方向の剛性を考慮する。
 - c. アンカ：6方向を固定として扱う。
 - d. ガイド：拘束方向及び回転拘束方向の剛性を考慮する。
- (7) 配管系の質量は、配管自体の質量（フランジ部含む。）の他に弁等の集中質量、管内流体の質量、付加質量として保温材等の質量を考慮するものとする。

2.2.1.2 解析条件

解析において考慮する解析条件を以下に示す。

- (1) 荷重条件
 - a. 内圧
 - b. 機械的荷重（自重及びその他の長期的荷重）
 - c. 機械的荷重（逃し弁又は安全弁の吹出し反力及びその他の短期的荷重）
 - d. 熱膨張及び熱による支持点の変位による応力
 - e. 配管肉厚方向の温度こう配及び管軸に沿った構造上不連続部に生じる熱応力

2.2.2 計算式

2.2.2.1 記号の定義

計算式中に説明のない記号の定義は下表のとおりとする。

記号	単位	定義
$B_1, B_2,$ B_{2b}, B_{2r}	—	告示第501号第48条及び設計・建設規格 PPB-3810に規定する応力係数（一次応力の計算に使用するもの）
$C_1, C_2, C_{2b},$ C_{2r}, C_3, C_3'	—	告示第501号第48条及び設計・建設規格 PPB-3810に規定する応力係数（一次＋二次応力の計算に使用するもの）
C_4	—	フェライト系材料に対し 1.1, オーステナイト系材料に対し 1.3
D_0	mm	管の外径
E	MPa	告示第501号別表第11及び設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表1に規定する縦弾性係数
E_{ab}	MPa	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した点又は材質を異にする点を境とするそれぞれの側の室温における告示第501号別表第11及び設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表1に規定する縦弾性係数の平均値
$K_1, K_2, K_{2b},$ K_{2r}, K_3	—	告示第501号第48条及び設計・建設規格 PPB-3810に規定する応力係数（ピーク応力の計算に使用するもの）

記号	単位	定義
$M_{b p}$	N・mm	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の機械的荷重により生ずるモーメント
$M_{b r}$	N・mm	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の機械的荷重（逃し弁又は安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重に限る。）により生ずるモーメント
$M_{b s}$	N・mm	<p>(S_n, S_p) : 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の熱膨張，支持点の変位及び機械的荷重（自重を除く。）により生ずるモーメント</p> <p>(S_n') : 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の支持点の変位（熱によるものを除く。）及び機械的荷重（自重を除く。）により生ずるモーメント</p> <p>(S_e) : 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生ずるモーメント</p>
M_c	N・mm	管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生ずるモーメント
$M_{i p}$	N・mm	管の機械的荷重により生ずるモーメント

記号	単位	定義
$M_{i s}$	N・mm	<p>(S_n, S_p): 管の熱膨張, 支持点の変位及び機械的荷重 (自重を除く。) により生ずるモーメント</p> <p>(S_n'): 管の支持点の変位 (熱によるものを除く。) 及び機械的荷重 (自重を除く。) により生ずるモーメント</p> <p>(S_e): 管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生ずるモーメント</p>
$M_{r p}$	N・mm	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の機械的荷重により生ずるモーメント
$M_{r s}$	N・mm	<p>(S_n, S_p): 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の熱膨張, 支持点の変位及び機械的荷重 (自重を除く。) により生ずるモーメント</p> <p>(S_n'): 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の支持点の変位 (熱によるものを除く。) 及び機械的荷重 (自重を除く。) により生ずるモーメント</p> <p>(S_e): 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生ずるモーメント</p>
n_i	—	繰返し荷重 i の実際の繰返し回数
N_i	—	繰返し荷重 i の許容繰返し回数
P	MPa	最高使用圧力
P_0	MPa	運転状態 I 及び II (供用状態 A 及び B) において生ずる圧力
P_0'	MPa	供用状態における最大圧力

記号	単位	定義
S_c	MPa	室温における告示第501号別表第6及び設計・建設規格付録材料図表 Part5 表5に規定する材料の許容引張応力
S_e	MPa	熱膨張応力
S_θ	MPa	繰返しピーク応力強さ（告示第501号第46条第5項及び設計・建設規格 PPB-3533 による。）
S_m	MPa	告示第501号別表第2及び設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表1に規定する材料の設計応力強さ
S_n	MPa	一次＋二次応力
S_n'	MPa	一次＋二次応力（熱によるものを除く。）
S_p	MPa	ピーク応力
$S_{pr m}$	MPa	一次応力
S_y	MPa	告示第501号別表第9及び設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点
t	mm	管の厚さ
T_a, T_b	℃	構造上の不連続部のうち応力集中度が最も高いと推定した点又は材質を異にする点を境とするそれぞれの側における次の計算式により計算した範囲 ℓ_a, ℓ_b 内の平均温度 $\ell_a = \sqrt{(d_a t_a)}, \ell_b = \sqrt{(d_b t_b)}$ d_a 及び d_b ：構造上の不連続部のうち応力集中度が最も高いと推定した点を境とするそれぞれの側における管の内径(mm) t_a 及び t_b ： ℓ_a 及び ℓ_b の範囲内における管の平均厚さ(mm)
ΔT	℃	温度差の変動範囲
ΔT_1	℃	線形化した厚さ方向の温度分布における管の内外面温度差
ΔT_2	℃	管の内面又は外面において生ずる温度とそれに対応する線形化した温度との差のうちいずれか大きい方の温度（負の場合は0とする。）

記号	単位	定義
Z, Z_i	mm^3	管の断面係数
Z_b	mm^3	管台又は突合せ溶接式テーパーに接続される分岐管の断面係数
Z_r	mm^3	管台又は突合せ溶接式テーパーに接続される主管の断面係数
α	$\text{mm}/\text{mm}^\circ\text{C}$	室温における告示第 5 0 1 号別表第 12 及び設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 2 に規定する熱膨張係数
α_a, α_b	$\text{mm}/\text{mm}^\circ\text{C}$	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した 点を境とするそれぞれの側の室温における告示第 5 0 1 号別 表第 12 及び設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 2 に 規定する熱膨張係数
ε_e	—	S_p を求めたピーク応力強さのサイクルに対して、弾性解析 により計算したときのひずみであり、次の計算式により計算 した値 $\varepsilon_e = \bar{\sigma}^* / E$ $\bar{\sigma}^*$ ：弾性解析によるミーゼス相当応力
ε_{ep}	—	S_p を求めたピーク応力強さのサイクルに対して、材料の応 力-ひずみ関係として、降伏応力を S_m の 1.5 倍の値とした 弾完全塑性体とした弾塑性解析により計算したときのひずみ であり、次の計算式により計算した値 $\varepsilon_{ep} = \bar{\sigma} / E + \bar{\varepsilon}^p$ $\bar{\sigma}$ ：弾塑性解析によるミーゼス相当応力 $\bar{\varepsilon}^p$ ：弾塑性解析によるミーゼス相当塑性ひずみ
(I, II)	—	運転状態 I 及び運転状態 II 若しくは設計条件相当の応力評価 を行う運転状態
(A, B)	—	供用状態 A 及び供用状態 B 若しくは設計条件相当の応力評価 を行う供用状態

2.2.2.2 応力計算

(1) 告示第501号第46条から第48条による評価

a. 一次応力 (告示第501号第46条第1号イ及びロ)

(a) 管台及び突合せ溶接式テイナー

$$S_{pr m}(1) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 1.5 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(1) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 1.5 \cdot S_m$$

b. 一次応力 (告示第501号第46条第2号)

(a) 管台及び突合せ溶接式テイナー

$$S_{pr m}(2) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 2.25 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(2) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 2.25 \cdot S_m$$

c. 一次応力 (告示第501号第46条第3号)

(a) 管台及び突合せ溶接式テイナー

$$S_{pr m}(3) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 3 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(3) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 3 \cdot S_m$$

d. 一次+二次応力 (告示第501号第46条第4号イ及びロ)

(a) 管台及び突合せ溶接式テイナー

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

e. ピーク応力 (告示第501号第46条第5号イ及びロ)

(a) 管台及び突合せ溶接式テイナー

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_{2b} \cdot C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + K_{2r} \cdot C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_2| / 0.7$$

(b) (a)以外の管

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_2 \cdot C_2 \cdot M_{is} / Z_i + K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_2| / 0.7$$

- f. 繰返しピーク応力強さ（告示第501号第46条第5号）

$$S_0 = S_p / 2$$

- g. 許容繰返し回数（告示第501号第46条第5号）

告示第501号 別図第1又は別図第2を用いて、繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し回数 N_i を算出する。

- h. 疲労累積係数（告示第501号第46条第5号）

$$\sum (n_i / N_i) \leq 1.0$$

- i. 簡易弾塑性解析（告示第501号第47条）

- (a) 告示第501号 別表第2に定める当該部分の材料の最小降伏点と最小引張強さとの比が0.8以下であること。（告示第501号第47条第1号）

- (b) 運転状態Ⅰ及びⅡにおいて生ずる当該部分の温度は、次の値を超えないこと。（告示第501号第47条第2号）

イ. 低合金鋼，マルテンサイト系ステンレス鋼及び炭素鋼 375°C

ロ. オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金 425°C

- (c) 一次＋二次応力(熱によるものを除く。)（告示第501号第47条第3号）

イ. 管台及び突合せ溶接式ティー

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + C_3' \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

ロ. イ.以外の管

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + C_3' \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

- (d) 運転状態Ⅰ及びⅡにおける告示第501号第46条第5号の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとした値は、告示第501号 別図第1又は別図第2における10回の許容繰返し回数に対応する許容繰返しピーク応力強さの値を超えないこと。（告示第501号第47条第4号）

- (e) 運転状態Ⅰ及びⅡにおける次の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとし、告示第501号 別図第1又は別図第2において、これに対応する許容繰返し回数が実際の繰返し回数以上であること。この場合において、実際の繰返し回数が2種類以上ある場合は、疲労累積係数が1以下でなければならない。（告示第501号第47条第5号）

イ. $S_n < 3 \cdot S_m$ の場合

$$S_0 = S_p / 2$$

ロ. $3 \cdot S_m \leq S_n \leq m \cdot 3 \cdot S_m$ の場合

$$S_0 = \text{MAX} [K_e \cdot S_p / 2, \{S_p + A_0 \cdot S_n \cdot (S_p / 3 \cdot S_m - 1)\} / 2]$$

$$K_e = 1 + (1 - n) \cdot (S_n / 3 \cdot S_m - 1) / \{n \cdot (m - 1)\}$$

m, n, A₀: 下表に掲げる材料の種類に応じ, それぞれの同表に掲げる値

材料の種類	m	n	A ₀
低合金鋼	2.0	0.2	1.0
マルテンサイト系ステンレス鋼	2.0	0.2	1.0
炭素鋼	3.0	0.2	0.66
オーステナイト系ステンレス鋼	1.7	0.3	0.7
高ニッケル合金	1.7	0.3	0.7

ハ. $m \cdot 3 \cdot S_m < S_n$ の場合

$$S_e = S_p / (2 \cdot n)$$

(f) 熱膨張応力 (告示第 501 号第 47 条第 6 号)

イ. 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_e = C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r \leq 3 \cdot S_m$$

ロ. イ以外の管

$$S_e = C_2 \cdot M_{is} / Z_i \leq 3 \cdot S_m$$

(2) 設計・建設規格 PPB-3500 による評価

a. 一次応力 (設計・建設規格 PPB-3520)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(1) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 1.5 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(1) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 1.5 \cdot S_m$$

b. 一次応力 (設計・建設規格 PPB-3552)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(2) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \\ \leq \text{Min} (2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(2) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq \text{Min} (2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$$

c. 一次応力 (設計・建設規格 PPB-3562)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(3) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \\ \leq \text{Min} (3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(3) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq \text{Min} (3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$$

d. 一次+二次応力 (設計・建設規格 PPB-3531)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + C_3 \cdot E_{ab} \cdot \\ | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \leq 3 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + C_3 \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \\ \leq 3 \cdot S_m$$

e. ピーク応力 (設計・建設規格 PPB-3532)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_{2b} \cdot C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + \\ K_{2r} \cdot C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_1 | / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot \\ | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | + E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_2 | / 0.7$$

(b) (a)以外の管

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_2 \cdot C_2 \cdot M_{is} / Z_i + \\ K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_1 | / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | + \\ E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_2 | / 0.7$$

- f. 繰返しピーク応力強さ（設計・建設規格 PPB-3533）

$$S_e = S_p / 2$$

- g. 許容繰返し回数（設計・建設規格 PPB-3534）

設計・建設規格 添付 4-2 3.1 及び 3.2 を用いて、設計・建設規格 PPB-3533 に従って算出された繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し回数 N_i を算出する。

- h. 疲労累積係数（設計・建設規格 PPB-3535）

$$\Sigma (n_i / N_i) \leq 1.0$$

- i. 簡易弾塑性解析（設計・建設規格 PPB-3536）

- (a) 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 1 に定める当該部分の材料の最小降伏点と最小引張強さとの比が 0.8 以下であること。

- (b) 供用状態 A 及び B において生ずる当該部分の温度は、次の値を超えないこと。

イ. 低合金鋼，マルテンサイト系ステンレス鋼及び炭素鋼 370°C

ロ. オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金 430°C

- (c) 一次＋二次応力(熱によるものを除く。)

- イ. 管台及び突合せ溶接式ティー

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + C_{3'} \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \leq 3 \cdot S_m$$

- ロ. イ. 以外の管

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + C_{3'} \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \leq 3 \cdot S_m$$

- (d) 供用状態 A 及び B における設計・建設規格 PPB-3533 の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとした値は、設計・建設規格 添付 4-2, 3.1 及び 3.2 における 10 回の許容繰返し回数に対応する許容繰返しピーク応力強さの値を超えないこと。

- (e) 供用状態 A 及び B における次の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとし、設計・建設規格 添付 4-2, 3.1 及び 3.2 において、これに対応する許容繰返し回数が実際の繰返し回数以上であること。この場合において、実際の繰返し回数が 2 種類以上ある場合は、疲労累積係数が 1 以下でなければならない。

$$S_e = K_e \cdot S_p / 2$$

K_e : 次の計算式により計算した値

- イ. $S_n < 3 \cdot S_m$ の場合

$$K_e = 1$$

ロ. $S_n \geq 3 \cdot S_m$ の場合

(イ) $K < B_0$ の場合

i. $S_n / (3 \cdot S_m) < [(q + A_0 / K - 1)$

$$- \sqrt{\{(q + A_0 / K - 1)^2 - 4 \cdot A_0 \cdot (q - 1)\}}] / (2 \cdot A_0) \text{ の場合}$$

$$K_e = K_e^* = 1 + A_0 \cdot \{S_n / (3 \cdot S_m) - 1 / K\}$$

ii. $S_n / (3 \cdot S_m) \geq [(q + A_0 / K - 1)$

$$- \sqrt{\{(q + A_0 / K - 1)^2 - 4 \cdot A_0 \cdot (q - 1)\}}] / (2 \cdot A_0) \text{ の場合}$$

$$K_e = K_e' = 1 + (q - 1) \cdot (1 - 3 \cdot S_m / S_n)$$

(ロ) $K \geq B_0$ の場合

i. $S_n / (3 \cdot S_m) < [(q - 1) - \sqrt{\{A_0 \cdot (1 - 1 / K) \cdot (q - 1)\}}] / a$ の場合

$$K_e = K_e^{**} = a \cdot S_n / (3 \cdot S_m) + A_0 \cdot (1 - 1 / K) + 1 - a$$

ii. $S_n / (3 \cdot S_m) \geq [(q - 1) - \sqrt{\{A_0 \cdot (1 - 1 / K) \cdot (q - 1)\}}] / a$ の場合

$$K_e = K_e' = 1 + (q - 1) \cdot (1 - 3 \cdot S_m / S_n)$$

ここで,

$$K = S_p / S_n,$$

$$a = A_0 \cdot (1 - 1 / K) + (q - 1) - 2 \cdot \sqrt{\{A_0 \cdot (1 - 1 / K) \cdot (q - 1)\}}$$

q, A_0, B_0 : 下表に掲げる材料の種類に応じ、それぞれの同表に掲げる値

材料の種類	q	A_0	B_0
低合金鋼	3.1	1.0	1.25
マルテンサイト系ステンレス鋼	3.1	1.0	1.25
炭素鋼	3.1	0.66	2.59
オーステナイト系ステンレス鋼	3.1	0.7	2.15
高ニッケル合金	3.1	0.7	2.15

$S_n \geq 3 \cdot S_m$ の場合、2.2.2.2(2)i.(e)ロ.に関わらず、次の計算式により計算した値を用いても良い。

$$K_e = \varepsilon_{ep} / \varepsilon_e$$

(f) 熱膨張応力

イ. 管台及び突合せ溶接式ティー

$$S_e = C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r \leq 3 \cdot S_m$$

ロ. (イ)以外の管

$$S_e = C_2 \cdot M_{is} / Z_i \leq 3 \cdot S_m$$

(g) 管の内外面の温度差の変動範囲

$$\Delta T \leq 1.4 \cdot y \cdot S_y / (E \cdot \alpha) \cdot C_4$$

y : x の値に応じ下表に示す値

x	0.3	0.5	0.7	0.8
y	3.33	2.00	1.20	0.80

(備考) 表中の値の中間の値は、比例法によって計算する。

x : 次式により計算した値

$$x = P_0' \cdot D_0 / (2 \cdot t) \cdot 1 / S_y$$

2.2.3 荷重の組合せ及び許容応力

計算における荷重の組合せ及び許容応力を以下に示す。

表 2-1 荷重の組合せ

管クラス	設備	荷重の組合せ	状態
クラス 1 管	原子炉冷却材 圧力バウンダリ	P + M + D	設計条件
		P + M + T + O	運転状態 I, II 供用状態 A, B
		P + M + D	運転状態 III 供用状態 C
		P + M + D	運転状態 IV 供用状態 D

表 2-1 中の記号

P : 内圧による荷重

M : 機械荷重 (自重除く。)

D : 配管の自重による荷重

T : 配管の熱膨張荷重 (支持点の熱膨張変位を含む。)

O : 過渡熱による荷重

表 2-2 許容応力（告示第 5 0 1 号第 46 条から第 48 条）

状態	一次応力 (曲げ応力を含む。)	一次+二次 応力	一次+二次 +ピーク応力
設計条件	$1.5 \cdot S_m$	—	—
運転状態 I, II	—	$3 \cdot S_m$	疲労累積係数の和が 1.0 以下であること。
運転状態 III	$2.25 \cdot S_m$	—	—
運転状態 IV	$3 \cdot S_m$	—	—

表 2-3 許容応力（設計・建設規格 PPB-3500）

状態	一次応力 (曲げ応力を含む。)	一次+二次 応力	一次+二次 +ピーク応力
設計条件	$1.5 \cdot S_m$	—	—
供用状態 A, B	—	$3 \cdot S_m$	疲労累積係数の和が 1.0 以下であること。
供用状態 C	$\text{Min} (2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$	—	—
供用状態 D	$\text{Min} (3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$	—	—

2.2.4 計算精度と桁処理方法

計算精度は6桁以上を確保する。表示する数値の桁処理方法は表2-4に示すとおりである。

表 2-4 数値の桁処理方法

数値の種類		単位	処理桁	処理方法	表示桁
圧力* ¹		MPa	—	—	小数点以下第2位* ²
温度	下記以外の温度	℃	—	—	整数位
	過渡変化温度差	℃	小数点以下第1位	切上げ	整数位
	許容温度差	℃	小数点以下第1位	切捨て	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	—	小数点以下第1位
	移動量	mm	小数点以下第2位	四捨五入	小数点以下第1位
	鳥瞰図記載	mm	小数点以下第1位	四捨五入	整数位
質量		kg	小数点以下第1位	四捨五入	整数位
ばね定数		N/mm	有効桁数 4 桁	四捨五入	有効桁数 3 桁
回転ばね定数		N・mm/rad	有効桁数 4 桁	四捨五入	有効桁数 3 桁
方向余弦		—	小数点以下第5位	四捨五入	小数点以下第4位
応力	算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
	許容応力* ³	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位
疲労累積係数		—	小数点以下第5位	切上げ	小数点以下第4位

注記 *1：必要に応じて kPa を使用する。また、静水頭は「静水頭」と表示する。

*2：必要に応じて小数点以下第3位又は第4位を用いる。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における許容応力は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする。また、告示別表に記載された許容応力は、各温度の値を SI 単位に換算し、設計・建設規格と同様の換算と桁処理を行う。

3. 計算書の構成

3.1 管の応力計算書

(1) 概要

本計算方法に基づき、管の応力計算を実施した結果を示す旨を記載する。

また、評価結果の記載方法は以下とする旨を記載する。

a. 管

工事計画記載範囲の管のうち、各応力区分における最大応力評価点の評価結果を解析モデル単位に記載する。また、各応力区分における最大応力評価点の許容値／発生値（以下「裕度」という。）が最小となる解析モデルを代表として鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載する。各応力区分における代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果についても記載する。

(2) 概略系統図及び鳥瞰図

a. 概略系統図

工事計画記載範囲の管を含む概略系統図を添付する。ただし、工事計画記載範囲のすべてについて既工認における評価結果の確認による評価を実施した系統については、既工認の計算書番号等を記載のうえ、添付を省略する。

b. 鳥瞰図

工事計画記載範囲の管のうち評価結果記載の解析モデル図を添付する。ただし、以下に該当する場合は、その旨を記載のうえ、添付を省略する。

(a) 既工認における評価結果の確認による評価を実施した範囲

既工認の計算書番号等を記載の上、添付を省略する。

(3) 計算条件

本項目記載内容及び添付フォーマットを以下に示す。ただし、鳥瞰図の添付を省略した範囲については、同様の理由で添付を省略する。

a. 設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管名称で区分し、管名称と対応する評価点番号を示す。

鳥瞰図番号

管名称	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料

鳥瞰図番号

管名称	対応する評価点

配管の質量（付加質量含む）

鳥瞰図番号

評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)

弁部の質量を下表に示す。

鳥瞰図番号

評価点	質量(kg)

弁部の寸法を下表に示す。

弁 No	評価点	外径(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)

支持点及び貫通部ばね定数

鳥瞰図番号

支持点番号	各軸方向ばね定数 (N/mm)			各軸回り回転ばね定数 (N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z

**印は斜め拘束を示しばね定数をXに示す。下段は方向余弦を示す。

b. 材料及び許容応力

材料	最高使用温度 (°C)	許容応力 (MPa) *			
		S _m	S _y	S _u	S _h

注記 * : 評価に使用しない許容応力については欄を設けない。

(4) 評価結果

工事計画記載範囲の管の各応力区分における最大発生応力の評価点の評価結果を示した表を解析モデル単位に添付する。解析モデルは各応力区分における裕度最小モデルを添付する。添付フォーマットを以下に示す。

a. 告示第501号 第46条から第48条による評価結果
鳥瞰図番号

運転状態	最大応力評価点	配管要素名称	最大応力区分	一次応力評価 (MPa)		一次+二次応力評価 (MPa)				疲労評価
				一次応力 S_{perm}	許容応力 $1.5 \cdot S_m$ $2.25 \cdot S_m$ $3 \cdot S_m$	一次+二次応力 S_n	熱膨張応力 S_e	熱を除いた一次+二次応力 S_n'	許容応力 $3 \cdot S_m$	疲労累積係数 U
(I, II)			$S_{perm} (1)$	Max	$1.5 \cdot S_m$					
(I, II)			S_n			Max			$3 \cdot S_m$	
(I, II)			S_e				Max		$3 \cdot S_m$	
(I, II)			S_n'					Max	$3 \cdot S_m$	
(I, II)			U							Max
III			$S_{perm} (2)$	Max	$2.25 \cdot S_m$					
IV			$S_{perm} (3)$	Max	$3 \cdot S_m$					

b. 設計・建設規格 PPB-3500 による評価結果
鳥瞰図番号

供用状態	最大応力評価点	配管要素名称	最大応力区分	一次応力評価 (MPa)		一次+二次応力評価 (MPa)				熱応力評価 (°C)		疲労評価 疲労累積係数 U
				一次応力 $S_{p,rm}$	許容応力 $1.5 \cdot S_m$ $\text{Min}(2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$ $\text{Min}(3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$	一次+二次応力 S_n	熱膨張応力 S_e	熱を除いた一次+二次応力 S_n'	許容応力 $3 \cdot S_m$	温度差の変動範囲 ΔT	許容温度差	
(A, B)			$S_{p,rm} (1)$	Max	$1.5 \cdot S_m$							
(A, B)			S_n			Max						
(A, B)			S_e				Max					
(A, B)			S_n'					Max				
(A, B)			ΔT						Max	*		
(A, B)			U									Max
C			$S_{p,rm} (2)$	Max	$\text{Min}(2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$							
D			$S_{p,rm} (3)$	Max	$\text{Min}(3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$							

注記* : 本書 2.2.2.2(2) i. (g) に基づき計算した値 $(1.4 \cdot y \cdot S_y / (E \cdot \alpha) \cdot C_4)$ を記載する。

(5) 代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果

代表モデルは各モデルの最大応力点の応力と裕度を算出し、応力分類毎に裕度最小のモデルを選定して鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載する。このため、下表の代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果を記載する。

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス1範囲 運転状態Ⅰ，Ⅱ）

No	配管モデル	運転状態(Ⅰ, Ⅱ)												
		一次応力(膜+曲げ)					一次+二次応力(Sn)					疲労評価		
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	疲労累積係数	代表
1	***-1	1	**	***	*,**	—	11	**	***	*,**	—	17	*,****	—
2	***-2	2	**	***	*,**	—	12	**	***	*,**	○	18	*,****	—
3	***-3	3	**	***	*,**	—	13	**	***	*,**	—	19	*,****	○
4	***-4	4	**	***	*,**	○	14	**	***	*,**	—	20	*,****	—
5	***-5	5	**	***	*,**	—	15	**	***	*,**	—	21	*,****	—
6	***-6	6	**	***	*,**	—	16	**	***	*,**	—	22	*,****	—

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス1範囲 運転状態Ⅲ，Ⅳ）

No	配管モデル	運転状態Ⅲ					運転状態Ⅳ				
		一次応力(膜+曲げ)					一次応力(膜+曲げ)				
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表
1	***-1	23	**	***	*,**	—	29	**	***	*,**	—
2	***-2	24	**	***	*,**	—	30	**	***	*,**	—
3	***-3	25	**	***	*,**	—	31	**	***	*,**	—
4	***-4	26	**	***	*,**	○	32	**	***	*,**	○
5	***-5	27	**	***	*,**	—	33	**	***	*,**	—
6	***-6	28	**	***	*,**	—	34	**	***	*,**	—

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス1範囲 供用状態A, B）

No	配管モデル	供用状態(A, B)												
		一次応力(膜+曲げ)					一次+二次応力(Sn)					疲労評価		
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	疲労累積係数	代表
1	***-1	1	**	***	*,**	—	11	**	***	*,**	—	17	*,****	—
2	***-2	2	**	***	*,**	—	12	**	***	*,**	○	18	*,****	—
3	***-3	3	**	***	*,**	—	13	**	***	*,**	—	19	*,****	○
4	***-4	4	**	***	*,**	○	14	**	***	*,**	—	20	*,****	—
5	***-5	5	**	***	*,**	—	15	**	***	*,**	—	21	*,****	—
6	***-6	6	**	***	*,**	—	16	**	***	*,**	—	22	*,****	—

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス1範囲 供用状態C, D）

No	配管モデル	供用状態C					供用状態D				
		一次応力(膜+曲げ)					一次応力(膜+曲げ)				
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表
1	***-1	23	**	***	*,**	—	29	**	***	*,**	—
2	***-2	24	**	***	*,**	—	30	**	***	*,**	—
3	***-3	25	**	***	*,**	—	31	**	***	*,**	—
4	***-4	26	**	***	*,**	○	32	**	***	*,**	○
5	***-5	27	**	***	*,**	—	33	**	***	*,**	—
6	***-6	28	**	***	*,**	—	34	**	***	*,**	—